Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2024. (111-126)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Impact of Polymer Emulsion on the Shear Strength of Aeolian Sand

Research Article

Mahsa Heravi[1], Akbar Cheshomi[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.82427.1229

1. Introduction

Nowadays, the development of transportation infrastructure in the arid and semi-arid regions of the world has made aeolian sand a borrows source in these regions. Aeolian sand has uniform granulation and does not have plastic properties, making it difficult, and in some cases impossible, to be compacted. This group of soil has a low bearing capacity due to looseness and granular structure. In a loose and saturated state, it has liquefaction potential under cyclic loading, and in the vicinity of water, it is wet and potential to collapse. Quartz is the main mineral of aeolian sands, which is accompanied by small amounts of feldspars and calcite. In unconfined conditions, it has poor geotechnical performance and needs improvement. Densification, reinforcement, drainage, and adding additive materials are the most important ways to improve the engineering characteristics of aeolian sands. Lime, cement, bitumen, and chemical additives are examples of additive materials for improving the engineering characteristics of aeolian sands. Much research on the use of polymer emulsions for stabilizing aeolian sands and granular soils has been performed since the late 1960s. Polymer emulsions are very small polymer particles (0.05-5 µm) dispersed in water and usually produced by emulsion polymerization. Being non-toxic, non-polluting, and cheap, they are considered a successful enhancer. Large areas of Iran, including parts of the Khuzestan plain, are covered with aeolian sands, and it is necessary to improve their engineering parameters by various methods in order to use them as borrowed sources. The present research investigated the effect of different percentages of vinyl acrylic polymer (VAP) emulsion on the shear strength parameters of aeolian sands in the mentioned areas.

2. Laboratory Program

2.1. Materials

The materials used in this research are aeolian sand from the Hor al-Azim region (Khuzestan Plain) and VAP. VAP is a viscous polymer material hardened by dissolving in water and losing moisture. It binds soil particles together and creates and increases soil strength. In this research, aeolian sand was mixed with 10%, 20%, and 30% VAP, respectively. Consequently, to determine the shear strength, four distinct samples with different percentages of sand and VAP were prepared and used for the next stages of the research.

2.2. Methods

The methods used in this research include a standard compaction test and a direct shear test. These two tests were performed according to the standards of ASTM D 698-78 and ASTM D 3080-90. The compaction test was performed in order to determine the maximum dry density and optimum water content and the direct shear test was performed to determine the shear strength parameters of the samples. The VAP was dissolved in water, and the weight ratios of VAP to water (P/W) 10, 20, and 30 were chosen (P/W×100=10%-20%-30%). According to the maximum dry density determined from the compaction test, the weight of the soil to be placed inside the shear molds was determined. Next, the prepared VAP solutions of 10%, 20%, and 30% were added to the soil in a way that the sample reached the optimum water content. The specified amount of soil was poured in three layers into cubic steel molds with a length and width of 5.7 cm and a depth of 3.7 cm to provide the possibility of compacting them to reach the maximum density. To speed up the sample preparation process, 15 cubic steel molds were used. The prepared samples were placed in the molds for 1, 7, 14, 21, and 28 days and then subjected to direct shear test. To perform the direct shear test, the steel molds were embedded in the mold of the direct shear machine and were sheared by four vertical stresses of 0.25, 0.5, 0.75, and 1 kg/cm^2. The reason for choosing four vertical stresses in the direct shear test was to check the results more closely and to eliminate the outlier data. By applying horizontal load and measuring horizontal displacements, the tests continued until reaching the maximum shear force necessary to break the sample.

3. Analysis of results

The results showed that with increasing the curing time, soil cohesion (C) increased and internal friction angle (φ)

*Manuscript received May 16, 2023, Revised, January 16, 2024, Accepted, April 16, 2024.

[1] MSc Student, Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran, Iran.

[2] Corresponding author. Associate Professor in Engineering Geology, Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran, Iran. **Email:** A.cheshomi@ut.ac.ir.

decreased. The rise in C with longer curing time results from filling the pore spaces between the grains with VAP solution and sticking the soil grains to each other. The reduction of φ is due to a layer of VAP on the grains' surface. This layer is the reduction of the friction between the grains. To investigate the simultaneous effect of C and φ, shear strength (S) was determined for each sample. For this purpose, the vertical stress was considered 1 kg/cm2. The results of the direct shear test showed that changing the percentage of VAP for one-day curing time had no effect on the shear strength. Therefore, it can be said that if the solution is not allowed to dry, it will not affect the shear strength of the sample. For the curing time of 28 days, the effect of VAP concentration on the shear strength is evident as the sample stabilized with 10% solution shows lower shear strength than the samples stabilized with 20% and 30%. The C and φ of the sample stabilized with 10% VAP in one-day curing time was 0.0006 kg/cm^2 and 32.33 degrees, respectively. Therefore, this sample has practically no C and its shear strength is caused by the φ of the sample. The C and φ of the same sample reached 0.76 kg/cm^2 and 9.87 degrees after 28 days, respectively. A significant increase in C and a decrease in the φ of the sample were seen. For this sample, the shear strength was 0.63 kg/cm^2 after one day, while it reached 1.02 kg/cm^2 after 7 days and showed a 104% increase. The C and φ when 20% VAP was used after one day of curing time was 0.004 kg/cm^2 and 32.39 degrees, respectively. In this case, despite the rise in the concentration of the VAP solution compared to the previous case, there was no change in the C and φ of the sample compared to the sample without additives due to the short curing time, but after 28 days, C was 1.13 kg/cm^2 and φ reached 7.41 degrees. Accordingly, the shear strength after 28 days showed a 101.6% increase compared to the curing time of 1 day. The C and φ for the 30% VAP after 1 day were 0.0138 kg/cm^2 and 32.44, respectively, which is similar to the previous two cases due to the short curing time. However, there was practically no change compared to the sample without additives. After 21 days, the C of the sample was 1.18 kg/cm^2 and φ was 6.40 degrees. Therefore, the shear strength after one day of curing was 0.63 kg/cm^2, which reached 1.3 kg/cm^2 after 21 days of curing, indicating an increase of 106.3%. This issue clearly shows the effect of curing time on increasing the shear strength of the sample, while also specifying that the effect of curing time on increasing the shear strength of sand is much higher than the concentration of the VAP solution.

4. Conclusions

The present study aimed to investigate the effect of VAP on the shear strength of aeolian sands in the Hor al-Azim region. First, solutions with concentrations of 10%, 20%, and 30% of VAP were made and added to the soil sample. Next, samples with maximum dry density and optimum water content were made and were subjected to direct shear tests in the curing times of 7, 14, 21, and 28 days to determine the shear strength parameters, and the following results were obtained.

- By increasing the curing time and the concentration of the VAP solution, the shear strength of the samples increased. The shear strength of the sample stabilized with 10%, 20%, and 30% VAP solution showed an increase of 104%, 111.7%, and 113.3%, respectively, compared to the sample without additive.
- By raising the concentration of the VAP solution and the curing time, the cohesion of the samples increased. The adhesion of the sample stabilized with 10%, 20%, and 30% solution at the curing times of 28, 28, and 21 days reached its maximum values of 0.76, 1.13, and 1.18 kg/cm^2.
- Electron microscope images revealed that the formation of bridges and connections between grains with increasing VAP solution concentration and curing time is the reason for cohesion improvement. Placing the polymer between the grains reduced the friction between them and decreased the internal friction angle of the stabilized samples.
- Increasing the curing time and the concentration of the VAP solution raised the shear strength of the sample, but the effect of the curing time was greater than the concentration of the VAP solution.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

بررسی تأثیر امولسیون پلیمری بر مقاومت برشی ماسه‌بادی*

مقاله پژوهشی

مهسا هروی[۱] اکبر چشمی[۲]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.82427.1229

چکیده تحقیق حاضر به بررسی تأثیر امولسیون پلیمری وینیل اکریلیک (VA) بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی دشت خوزستان پرداخته است. بدین منظور پس از نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه مذکور، آزمایش تراکم استاندارد روی آن انجام شده و درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه‌بادی تعیین گردید. سپس محلول‌هایی با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ از ماده پلیمری ساخته و به گونه‌ای به ماسه‌بادی اضافه گردید که به رطوبت بهینه برسد. نمونه‌های آماده شده با وزن مخصوص خشک حداکثر در قالب‌های فلزی چهارگوش قرار گرفته و به مدت ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز در فضای آزمایشگاه نگه‌داری شد، سپس تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر نشان داد، با افزایش زمان عمل‌آوری و افزایش غلظت محلول پلیمری، چسبندگی و مقاومت برشی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. به طوری که محلول پلیمری با غلظت ۳۰ در صد موجب افزایش ۱۴۶ درصدی مقاومت برشی ماسه‌بادی تثبیت شده نسبت به نمونه پایه شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده ایجاد اتصال و برقراری پل‌هایی بین دانه‌های ماسه در نمونه‌های تثبیت شده بوده که این امر دلیل افزایش چسبندگی و مقاومت برشی نمونه‌ها است.

واژه‌های کلیدی ماسه‌بادی، مقاومت برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، امولسیون پلیمری.

Investigation Impact of Polymer Emulsion on Shear Strength of Aeolian Sand

Mahsa Heravi Akbar Cheshomi

Abstract *The present study has investigated the effect of vinyl acrylic polymer emulsion (VA) on the shear strength of aeolian sands in the Khuzestan plain. For this purpose, after sampling the aeolian sands of the mentioned area, a standard compaction test was performed and the optimum water content and maximum dry density of the aeolian sand were determined. Then, solutions with percentages of 10, 20 and 30% of polymer material were made and added to the aeolian sand in such a way that it reached the optimum water content. The prepared soil with maximum dry density was placed in square metal molds kept in the laboratory for 1, 7, 14 and 21 days and then subjected to direct shear test. The results of the direct shear test on the stabilized samples showed that by increasing the curing time and the concentration of the polymer solution, cohesion and the shear strength increase and the angle of internal friction decreases. So the polymer solution with a concentration of 30% has caused a 146% increase in shear strength aeolian sand. Electron microscope images (SEM) show the creation of bridges between sand grains in the stabilized samples, which is the reason for the increased cohesion and shear strength of the samples.*

Key words Aeolian sand, Shear strength, Cohesion, Internal friction angle, Polymer emulsion.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۲۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران.

Email: a.cheshomii@ut.ac.ir.

مقدمه

امروزه توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل در مناطق خشک و نیمه خشک جهان موجب شده از ماسه‌های بادی به عنوان منبع قرضه در این مناطق استفاده کنند. دانه‌بندی ماسه‌های بادی یکنواخت بوده، فاقد خاصیت خمیری هستند، لذا متراکم کردن آن‌ها بسیار سخت و در بعضی موارد غیر ممکن است. این گروه از خاک‌ها به دلیل سست بودن و ساختار دانه‌ای ظرفیت باربری پایینی دارند [1]. در حالت سست و اشباع، تحت بارگذاری سیکلی مستعد روان‌گرایی بوده و در مجاورت با آب، خیس شده و مستعد فروریزش هستند [2,3]. اندازه دانه‌ها بین ۰/۰۸ تا ۰/۴ میلی‌متر، درصد رطوبت بین صفر تا ۴٪، نفوذپذیری بین ۰/۰۰۰۳۴ تا ۰/۰۱ سانتی‌متر بر ثانیه، حداکثر جذب آب ۱٪ ، چگالی ویژه (Gs) بین ۲/۴۴ تا ۲/۸۷، وزن مخصوص خشک حداکثر بین ۱/۶۴۲ تا ۱/۷۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد رطوبت بهینه بین ۱۱ تا ۱۴/۵، چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی بین ۳۹ تا ۴۲ درجه برای ماسه‌های بادی گزارش شده است [4-7].کوارتز اصلی‌ترین کانی تشکیل دهنده ماسه‌های بادی بوده که با مقادیر کمی از فلدسپات‌ها و کلسیت همراه است [4,5]. در شرایط نامحصور عملکرد ژئوتکنیکی ضعیفی داشته و نیازمند به‌سازی هستند [1].

متراکم کردن، تقویت کردن، زهکش کردن، و افزودن مصالح از مهم‌ترین روش‌های بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی است. الیویرا و همکاران، عباسی و مهدیه، الیویرا و روزا نمونه-هایی از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، الکتریکی، مکانیکی و یا بیولوژیکی برای بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی را گزارش کردند [8-10]. استفاده از آهک، سیمان، قیر و افزودنی-های شیمیایی نمونه‌هایی از روش‌های بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی با افزودن مصالح به آن‌ها است. [11-13].

تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از امولسیون‌های پلیمری برای تثبیت ماسه‌های بادی و خاک‌های دانه‌ای از اواخر دهه ۱۹۶۰ گزارش شده است [14,15]. امولسیون‌های پلیمری ذرات پلیمری بسیار کوچک (با قطر پنج صدم تا پنج میکرومتر) هستند، در آب پراکنده شده و معمولا با پلیمریزاسیون امولسیونی تولید می‌شوند [16]. امولسیون‌های پلیمری به دلیل چسبندگی قوی، انقباض کم در زمان گیرش، حساسیت کم آب، مقاومت در برابر تشعشعات خورشیدی و تخریب بیولوژیکی، غیر سمی، غیر آلاینده و ارزان بودن، به عنوان یک تقویت‌کننده موفق در نظر گرفته می‌شوند [17]. اونیجکوه و غتائورا برای تثبیت خاک‌های ریزدانه معدنی از امولسیون‌های پلیمری با غلظت ۰/۲۶ تا ۱/۳۲ درصد استفاده و نشان دادند که این افزودنی‌ها باعث افزایش چسبندگی، مقاومت فشاری، خمشی و کششی خاک می‌شود [18]. آناگنوستوپولوس و پاپالیانگوس تأثیر دوغاب سیمان، رس، آب، همراه با درصدهای مختلف امولسیون اکریلیک رزین و متیل متااکریلات را بر بهبود مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و تخلخل ماسه بررسی و نتیجه گرفتند افزودن امولسیون به دوغاب باعث افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کاهش تخلخل ماسه می‌شود [19]. گیلازقی و همکاران از پلیمر مایع پلی‌اورتان برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته بالا استفاده و افزایش ۹۰ درصدی مقاومت نهایی نسبت به مقاومت اولیه را گزارش کردند [20]. الخنباشی و عبدالله به بررسی تأثیر ۳ نوع امولسیون اکریلیک بر نفوذپذیری، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای پرداخته و نشان دادند که استفاده از افزودنی مذکور باعث کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری و افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته می‌شود [21]. هاتا و همکاران با انجام آزمایش‌های تک‌محوری به بررسی اثر الیاف پلی وینیل الکل و سیمان پرتلند بر رفتار ماسه پرداخته و نشان دادند که افزودن پلیمر و مخلوط سیمان با پلیمر باعث افزایش مقاومت تک‌محوری شده است [22]. کاهش نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی در اثر افزودن پلیمرهای آلی نظیر وینیل استات و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک با افزودن پلی وینیل استات گزارش شده است [23-25]. افزایش مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای با افزودن ۱/۲ و ۲ درصد لیگنوسولفونات و اضافه کردن ۰/۵ تا ۵٪ صمغ ژلان گزارش شده است [26,27]. لی و همکاران از صمغ زانتان برای بهبود مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای استفاده و نشان دادند ۱ درصد از صمغ زانتان مقاومت بین ذرات ماسه را تا ۱۴ برابر بهبود می‌بخشد [28]. رنجبر و همکاران به بررسی تأثیر سیمان و الیاف پت، پلی پروپیلن و کیسه‌های پلاستیکی بر پارامترهای مقاومتی ماسه بابلسر با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری، پرداخته و نشان دادند الیاف پت باعث بیشترین افزایش مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای شده است [29]. خالقیان و صبا مقدار ۶ درصد آهک و ۴ نانو پلیمر استات را به عنوان مقادیر بهینه برای تثبیت خاک ماسه رسی گزارش کردند [30]. حاجیان نژاد و

همکاران افزایش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای در اثر اضافه کردن خرده‌ها و نوارهای پلی‌اتیلن ترفتالات را گزارش کردند [31]. لیو و همکاران به بررسی اثرات نوعی پلیمر آلی مبتنی بر آب و الیاف شیشه بر روی ماسه پرداختند و گزارش کردند که خاک‌های آغشته شده با پلیمرهای آلی سنتز شده، مقاومت تک‌محوری، کششی و چسبندگی را بهبود می‌دهند [32]. آریاس‌تروجیلو و همکاران به مطالعه تأثیر وینیل اکریلیک بر پارامترهای مهندسی ماسه‌های بادی عربستان پرداخته و نشان دادند رابطه خطی مستقیم بین درصد پلیمر افزوده شده و وزن مخصوص حداکثر خشک خاک وجود دارد [1]. زندیه و همکاران به بررسی تأثیر پلیمر پلی وینیل استات و پلی وینیل اکریلات بر رفتار ماسه‌بادی پرداخته و گزارش کردند پلیمرهای مذکور مقاومت فشاری محدود نشده را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند [33]. سلطانی جیقه و همکاران با انجام آزمایش‌های برش مستقیم دریافتند که افزودن ۶۰ درصد ماسه به رس مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد [34]. جانعلی‌زاده و همکاران به بررسی تأثیر استفاده از پلیمرهای سدیم پلی‌اکریلات و پلی‌الکترولیت‌آنیونی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک پرداختند و نشان دادند افزودن پلیمرهای مذکور باعث افزایش مقاومت فشارشی و برشی رس، کائولینیت و ماسه‌بادی می‌شود [35]. اتم و آل- تمیمی نشان دادند الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت برشی ماسه‌بادی می‌-گردد [36]. احمدی مطلق و سلطانی جیقه به بررسی اثر پلی الکترولیت کاتیونی بر رفتار ژئوتکنیکی ماسه‌بادی پرداخته و نشان دادند که با افزودن پلیمر مذکور مقاومت فشاری و برشی خاک افزایش می‌یابد [37]. یائو و همکاران به مطالعه الیاف پلی وینیل الکل بر خواص مکانیکی و رفتار ریزساختاری خاک سیلتی سیمانی پرداخته و نشان دادند الیاف مذکور منجر به افزایش مقاومت فشاری و بهبود قابل توجهی در استحکام کششی و مقاومت خمشی می‌شود [38]. فاتحی و همکاران تأثیر رزین کازئین بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی ماسه را بررسی و نشان دادند افزودنی مذکور باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌شود [39]. در تحقیقی تأثیر مخلوط رزین اپوکسی بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماسه بررسی گردید و مشخص شد، رزین اپوکسی باعث افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی ماسه شده است. کاهش زاویه اصطکاک داخلی ناشی از قرار گرفتن قشری از پلیمر روی سطح ذرات بوده که اصطکاک بین دانه‌ها را کاهش داده است [40].

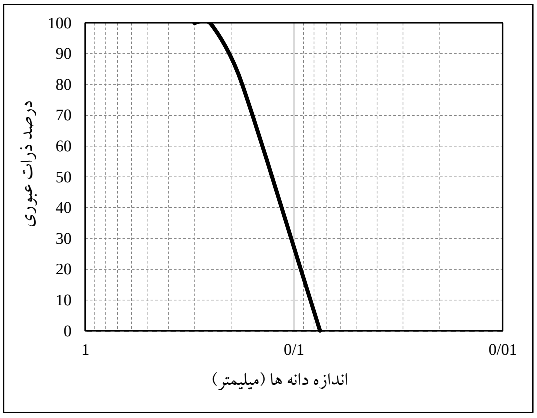
مناطق وسیعی از کشور ایران از جمله مناطقی از دشت خوز ستان با ما سه‌بادی پو شیده شده، برای ا ستفاده از آن‌ها به عنوان منابع قرضه لازم است با روش‌های مختلف پارامترهای مهندسی آن‌ها بهبود یابد. تحقیق حاضر به بررسی تأثیر درصد های مختلف امولسیون پلیمری وینیل اکریلیک بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌های بادی منطقه مذکور پرداخته است. به این منظور نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم صورت گرفته و بعد از تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه آن‌ها، مخلوط هایی از ماسه‌بادی با درصدهای مختلف امولسیون پلیمری ساخته و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در دمای آزمایشگاه تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. استفاده از ماسه‌بادی منطقه‌ای خاص بازای درصد های مختلف امولسیون پلیمری با زمان های عمل‌آوری مختلف می‌تواند به عنوان نوآوری تحقیق حاضر در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد ا ستفاده شده در تحقیق حا ضر ما سه‌بادی منطقه هورالعظیم (دشت خوزستان) و پلیمر وینیل اکریلیک می‌باشد. منحنی دانه‌بندی ماسه‌بادی در شکل (۱) ارائه شده است. وینیل اکریلیک ماده پلیمری چسبناکی ا ست که با حل شدن در آب و از د ست دادن رطوبت سخت شده، ذرات خاک را به هم چسبانده و باعث ایجاد و افزایش مقاومت خاک می‌شود. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مذکور در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق، ماسه‌بادی به ترتیب با ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد محلول پلیمر مخلوط گردید. بر این اساس برای تعیین مقاومت برشی، ۴ نمونه مختلف با درصدهای متفاوت ماسه‌بادی و پلیمر آماده و برای مراحل بعدی تحقیق استفاده شد.



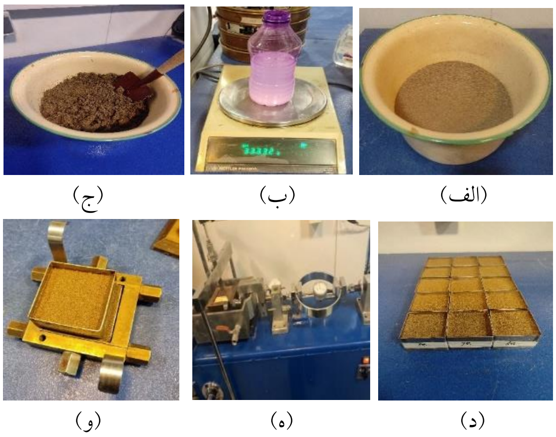
شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه‌بادی استفاده شده در تحقیق

جدول ۱ خصوصیات پلیمر وینیل اکریلیک

شکل ظاهری	رنگ	حلالیت در آب	چگالی (g/cm^3)	ویسکوزیته	pH
مایع	شیری	محلول	۱/۱-۰۲/۱	۲۰-۱۰۰	۳-۵

روش‌ها

روش‌های استفاده شده در تحقیق حاضر شامل آزمایش تراکم استاندارد و برش مستقیم است. این دو آزمایش بر اساس استانداردهای شماره ASTM D 698-78 و ASTM D 3080-90 انجام شد. آزمایش تراکم با هدف تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه و آزمایش برش مستقیم با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها انجام گردید. آزمایش تراکم با قالب ۴ اینچی روی نمونه ماسه‌بادی انجام شد. با توجه به اینکه بررسی تأثیر غلظت پلیمر بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌بادی هدف تحقیق حاضر می‌باشد، لذا برای ترکیب پلیمر با خاک، ابتدا پلیمر در آب حل گردید. نسبت وزنی پلیمر به آب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ انتخاب شد ($\frac{P}{W} \times 100 = 10\% - 20\% - 30\%$). بر این اساس در تحقیق حاضر محلول‌های مذکور به عنوان محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد معرفی شده است. با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر که از آزمایش تراکم تعیین شد، وزن مقدار خاک جهت قرارگیری در داخل قالب‌های برش تعیین گردید. سپس محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد تهیه شده، به نحوی به خاک اضافه شد که نمونه به درصد رطوبت بهینه برسد. مقدار خاک مشخص شده در سه لایه داخل قالب‌های استیل مکعبی با طول و عرض ۵/۷ سانتی‌متر و عمق ۳/۷ سانتی‌متر ریخته شد تا امکان متراکم کردن آن‌ها برای رسیدن به چگالی حداکثر فراهم گردد. برای سرعت بخشیدن به فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها از ۱۵ قالب استیل مکعبی استفاده شد. نمونه‌های آماده شده در قالب‌ها در فضای آزمایشگاه به مدت ۱، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ قرار گرفته و سپس تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. برای انجام آزمایش برش مستقیم، قالب‌های استیل داخل قالب دستگاه برش مستقیم جاسازی شده و تحت، ۴ تنش قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت برش قرار گرفتند. دلیل انتخاب چهار تنش قائم در آزمایش برش مستقیم بررسی دقیق‌تر نتایج و حذف کردن داده‌های پرت احتمالی بوده است. با اعمال بار افقی و اندازه‌گیری جابه‌جایی های افقی، آزمایش‌ها تا رسیدن به حداکثر نیروی برشی لازم برای گسیخته شدن نمونه ادامه یافت. در شکل (۲) مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است.



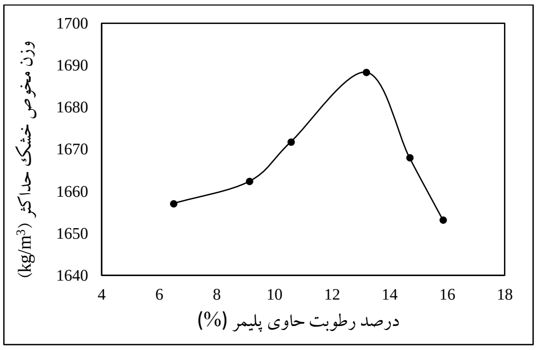
شکل ۲ آماده سازی نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت برشی، (الف) نمونه ماسه‌بادی، (ب) محلول پلیمر، (ج) اضافه کردن محلول پلیمر به ماسه‌بادی، (د) قالب‌های مکعبی به همراه نمونه‌های آماده شده جهت قرارگیری در دستگاه برش، (ه) دستگاه آزمایش برش مستقیم، (و) نمونه در پایان آزمایش برش مستقیم

نتایج

آزمایش برش مستقیم

شکل (۳) نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک در مقابل درصد رطوبت برای ماسه‌بادی را نشان می‌دهد. هدف از انجام این آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه ماسه‌بادی بوده است. با توجه به شکل وزن مخصوص خشک

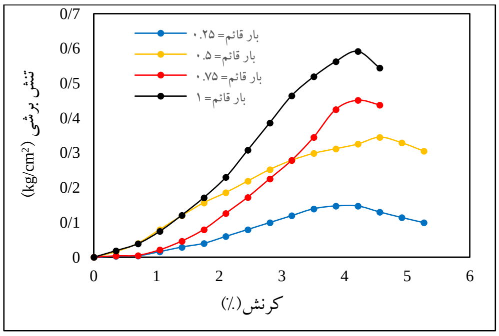
حداکثر ماسه‌بادی ۱۶۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد رطوبت بهینه ۱۳/۱۸ درصد تعیین شد. تقعر مشاهده شده در بخش اول منحنی تراکم (رطوبت ۹/۱۳ درصد) نشان می‌دهد زمانی که درصد رطوبت از ۶/۴۹ به ۹/۱۳ درصد افزایش یافته میزان جابه‌جایی دانه‌ها برای رسیدن به وزن مخصوص بیشتر نسبت به حالتی که رطوبت از ۹/۱۳ به ۱۰/۵۷ درصد افزایش یافته کمتر بوده است. نمونه‌های ساخته شده بعدی برای آزمایش برش مستقیم با این وزن مخصوص و درصد رطوبت ساخته شدند. با توجه به اهداف تحقیق برای رطوبت‌دهی به خاک از محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده شد.



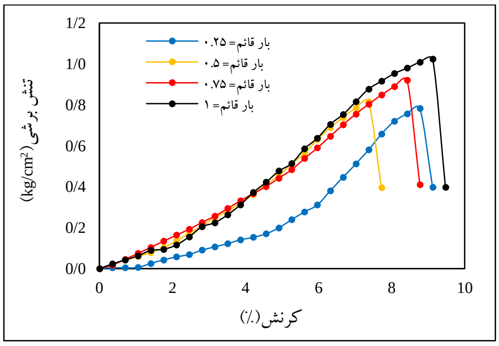
شکل ۳ منحنی تراکم ماسه‌بادی

آزمایش برش مستقیم با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌بادی تثبیت شده با درصدهای مختلف پلیمر در زمان‌های عمل‌آوری مختلف انجام شد. جزئیات مربوط به روش آزمایش و آماده‌سازی نمونه‌ها در بخش قبل بیان شد. با انجام آزمایش نمودار تغییرات تنش برشی در مقابل کرنش بازای تنش‌های قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسم و تنش برشی حداکثر بازای تنش قائم مشخص تعیین گردید. در شکل (۴) تعدادی از نمودارهای مذکور برای ماسه‌بادی تثبیت نشده، ماسه‌بادی تثبیت شده با محلول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۱ روز نشان داده شده است.

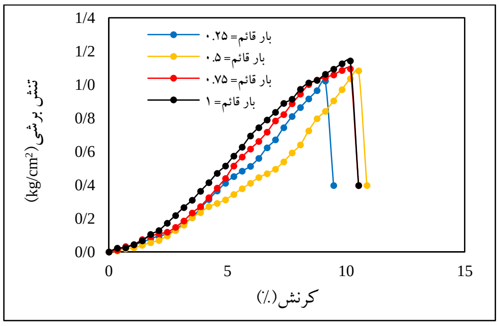
منحنی‌های ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد افزودن پلیمر به ماسه‌بادی باعث شده منحنی‌های تنش برشی- کرنش به دلیل چسبیدن دانه‌ها به یکدیگر رفتار شکننده داشته باشند. با توجه به منحنی‌های تنش برشی- کرنش مقاومت برشی حداکثر نظیر هر تنش قائم تعیین گردید. محل تغییر شیب در این منحنی‌ها معرف حداکثر تنش برشی است.



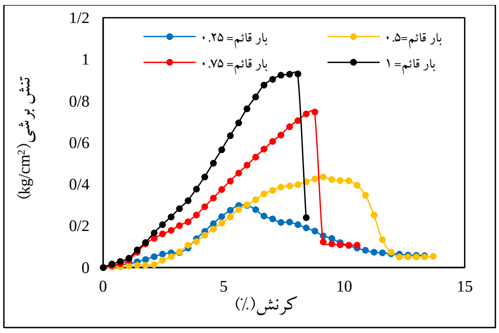
(الف)



(ب)



(ج)



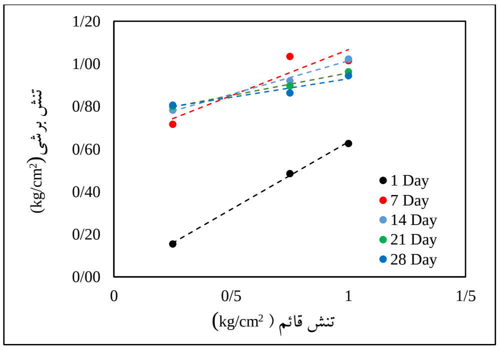
(د)

شکل ۴ نمودار تنش- کرنش: (الف) ماسه‌بادی بدون افزودنی، (ب) ۱۰ درصد VA بعد از ۱۴ روز، (ج) ۲۰ درصد VA بعد از ۲۱ روز، (د) ۳۰ درصد VA بعد از ۷ روز

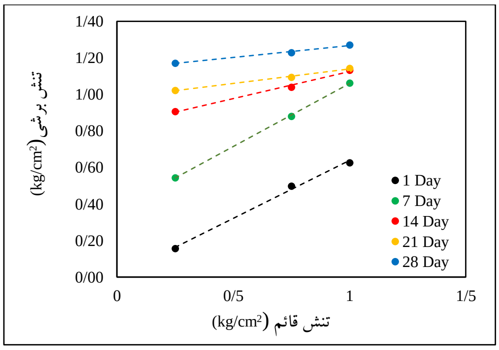
به منظور به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی نمودار

تغییرات تنش برشی در مقابل تنش قائم بر اساس سه نقطه‌ای که بهترین هم‌بستگی را دا شته ر سم گردید. با ا ستفاده از شیب و عرض از مبدأ خط مذکور زاویه ا صطکاک داخلی و چ سبندگی خاک تعیین شد.

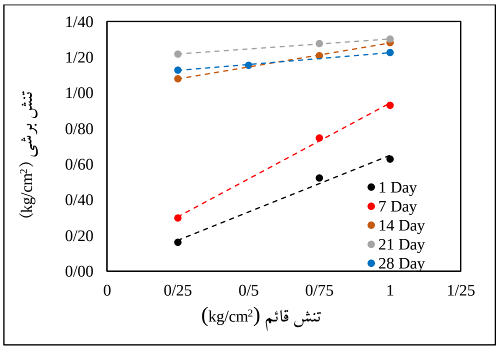
در شکل (۵) منحنی تغییرات تنش برشی در مقابل تنش قائم برای نمونه‌های بدون افزودنی و ۱۰ ، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر در زمان‌های عمل‌آوری مختلف ارائه شده است. بر اساس منحنی‌های مذکور مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر نمونه تعیین گردیده است.



(الف)



(ب)



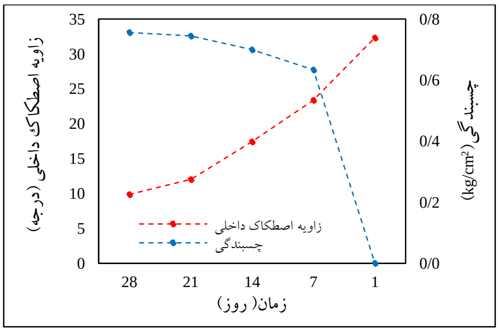
(ج)

شکل ۵ نمودار زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زمان عمل‌آوری ماسه‌بادی با (الف) ۱۰ درصد امولسیون پلیمر VA، (ب) ۲۰ درصد امولسیون پلیمر VA، (ج) ۳۰ درصد امولسیون پلیمر VA

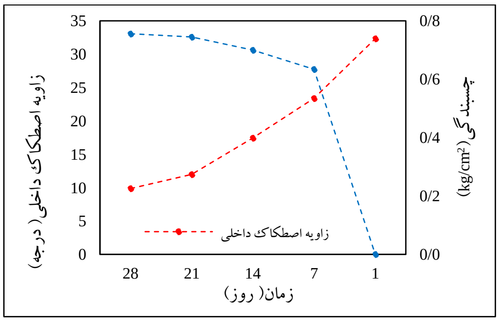
تجزیه و تحلیل نتایج

آزمایش برش مستقیم

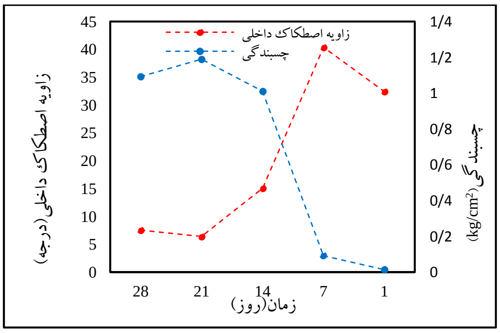
در شکل (۶-الف) تا (۶-ج)، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف، به ازای درصدهای مختلف محلول پلیمری نشان داده شده است. به طور مثال شکل (۶-الف) مربوط به نمونه‌ای است که با محلول ۱۰ درصدی پلیمر تثبیت شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. این روند تغییرات برای شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) که مربوط به خاک تثبیت شده با محلول پلیمری ۲۰ و ۳۰ درصد است نیز مشاهده می‌گردد.



(الف)



(ب)



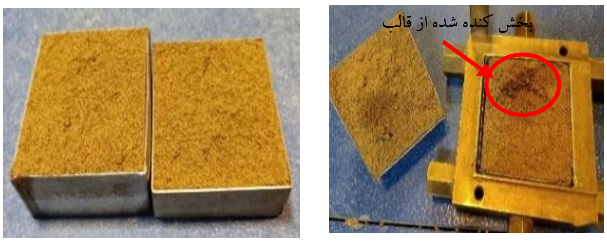
(ج)

شکل ۶ نمودار زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زمان عمل‌آوری ماسه‌بادی با (الف) ۱۰ درصد محلول پلیمر VA، (ب) ۲۰ درصد محلول پلیمر VA، (ج) ۳۰ درصد محلول پلیمر VA

افزایش چسـبندگی با افزایش زمان عمل‌آوری ناشـی از پر شدن فضاهای خالی بین دانه‌ها با محلول پلیمری و خشک شدن پلیمر در این فضاها و چسباندن دانه‌های خاک به همدیگر است. کاهش زاویه اصطکاک داخلی ناشی از کم شدن اصطکاک بین دانه‌ها به دلیل قرارگرفتن قشری از پلیمر روی دانه‌ها است.

در شکل (۷) تصویر سطح نمونه بعد از اتمام آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. شکل (۷-الف) مربوط به نمونه‌ای اسـت که با ۳۰ درصـد محلول پلیمری بعد از ۷ روز عمل‌آوری تحت بار قائم ۰/۲۵ کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع آزمایش شـده است.

همان طور که دیده می شود به دلیل چسبندگی ایجاد شده سطح برش به صورت مستقیم و صاف تشکیل نشده است. در حالی که شکل (۷-ب) مربوط به نمونه ماسه‌بادی بدون افزودنی است، سطح برش به صورت مستقیم و صاف است.



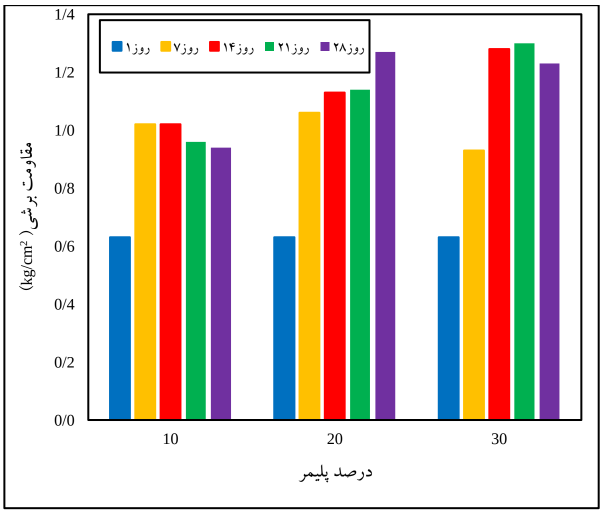
(ب) (الف)

شکل ۷ سطح نمونه بعد از اتمام آزمایش برش مستقیم: (الف) نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد محلول پلیمر، (ب) نمونه ماسه‌بادی بدون افزودنی

عدم تشـکیل سـطح برش صـاف و مسـتقیم در نمونه‌های تثبیت شـده باعث می‌گردد که رفتار نمونه های در لحظه گسـیختگی حالت شـکننده داشـته باشـد. این موضـوع در منحنی‌های تنش برشی در مقابل کرنش که در شکل (۴) نشان داده شـده، قابل مشـاهده اسـت. شـکل (۴-الف) که مربوط به نمونه تثبیت نشـده اسـت بعد از رسـیدن به نقطه حداکثر مقدار تنش برشی به ازای کرنش‌های مشخص با روندی کاهشی ادامه می‌یابد اما شـکل (۴-د) که مربوط به نمونه ۳۰ درصـد پلیمر اسـت بعد از رسـیدن به نقطه حداکثر تنش برشـی با شـیب تند کاهش یافته و رفتار کاملا شکننده‌ای مشاهده می شود. بنابراین افزودن پلیمر باعث افزایش سـختی خاک شـده و رفتار خاک را شکننده می‌کند.

بر اسـاس معیار گسـیختگی موهر- کولمب چسـبندگی و زاویه اصطکاک داخلی دو مؤلفه تشکیل دهنده مقاومت برشی بوده و تفکیک تأثیر هر کدام از آن‌ها به صـورت مجزا ممکن اسـت باعث ایجاد خطا گردد. بدین جهت در ادامه به تأثیر هم‌زمان این دو پارامتر پرداخته شده است. در شکل (۸) مقاومت برشی نمونه‌های مختلف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت مقایسه شده است.

این شکل به ازای تنش قائم ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در مقابل زمان برای نمونه های تثبیت شـده با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر رسم شده است. همان طور که از نمودارها مشخص است، مقاومت برشی وقتی از محلول ۱۰ درصد در زمان عمل‌آوری یک روز استفاده شده، در همه نمونه‌ها یکسان است. بنابراین تغییر درصد محلول در زمان عمل‌آوری یک روز تأثیری روی مقاومت برشی نداشته است. بنابراین می‌توان گفت که اگر به محلول اجازه خشک شدن و گیرش داده نشود تأثیری روی مقاومت برشی نمونه نخواهد داشت. وقتی زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز می‌رسـد تأثیر غلظت روی مقاومت برشـی مشـهود است. به طوری که نمونه‌ای که با ۱۰ درصد محلول تثبیت شده مقاومت برشـی کمتری نسـبت به نمونه‌هایی که با ۲۰ و ۳۰ درصـد تثبیت شـده‌اند نشـان می‌دهد. برای مقایسـه هم‌زمان پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و مقدار مقاومت برشی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف به ازای درصدهای مختلف پلیمر شکل (۹) ترسیم شده است.

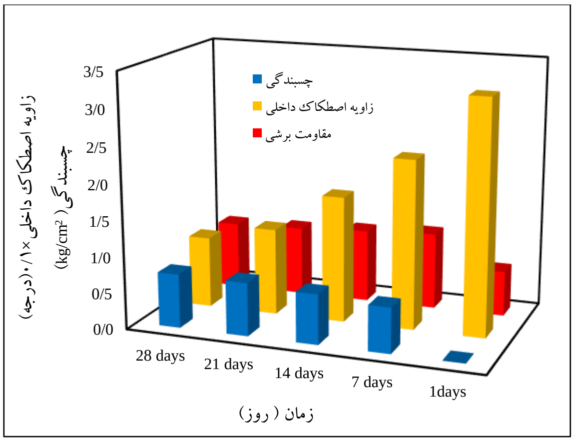


شکل ۸ مقایسه مقاومت برشی به ازای تنش قائم ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نمونه تثبیت شده با درصدهای مختلف محلول پلیمری

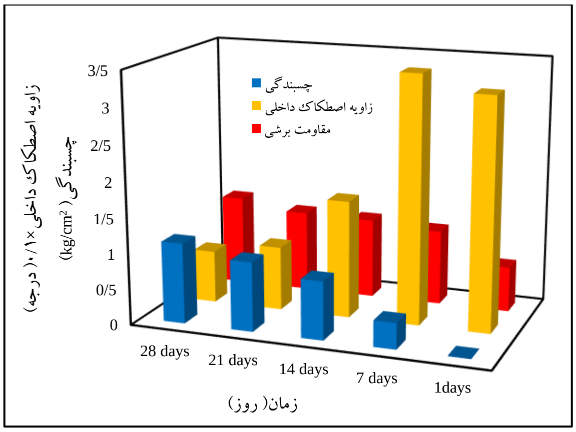
همان طور که در شـکل (۹–الف) نشـان داده شـده اسـت، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰ در صد پلیمر در زمان عمل‌آوری ۱ روز ۰/۰۰۰۶ کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع و ۳۲/۳۳ درجه اسـت. بنابراین نمونه یک روزه عملا فاقد چسـبندگی بوده و مقاومت برشـی آن ناشـی از زاویه اصـطکاک داخلی نمونه اسـت. چسـبندگی و زاویه اصـطکاک داخلی همین نمونه بعد از گذشـت ۲۸ روز به ۰/۷۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۹/۸۷ درجه رسیده است. افزایش قابل توجهی در چ سبندگی و کاه شی در زاویه ا صطکاک داخلی نمونه دیده می شود. برای این نمونه مقاومت بر شی بعد از گذ شت یک روز ۰/۶۳کیلوگرم گذشـت بر سـانتی‌متر مربع بوده در حالی که این مقاومت بعد از ۷ روز به ۱/۰۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده و ۱۰۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

در شکل (۹–ب) م شاهده می شود که چ سبندگی و زاویه اصطکاک داخلی زمانی‌که از محلول ۲۰ درصد استفاده شده بعد از گذشـــت یک روز ، ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ســـانتی‌متر مربع و ۳۲/۳۹ درجه اســـت. در این حالت نیز با وجود افزایش غلظت محلول پلیمری نسـبت به حالت قبل ولی به دلیل کم بودن زمان عمل‌آوری عملا تغییری در چسبندگی و زاویه ا صطکاک داخلی نمونه نسبت به نمونه بدون افزودنی دیده نشده ا ست لیکن بعد از گذشـت ۲۸ روز چسـبندگی به ۱/۱۳ کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع و زاویه اصـطکاک داخلی به ۷/۴۱ درجه می‌رسـد. بر این اسـاس مقاومت برشـی بعد از گذشـت ۲۸ روز نسـبت به زمان عمل‌آوری ۱ روز، ۱۰۱/۶ درصد افزایش نشان می‌دهد.

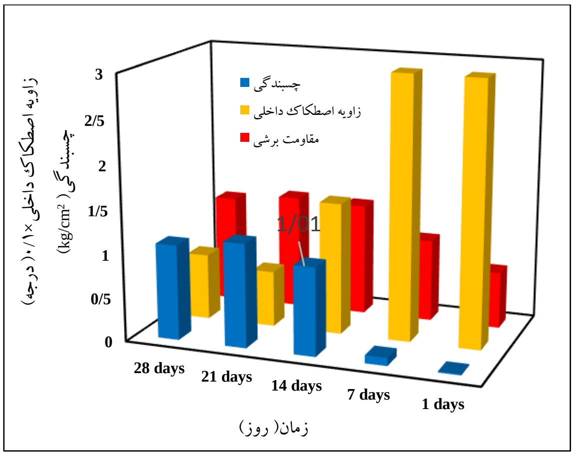
در شکل (۹–ج)، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای محلول ۳۰ درصـد در بعد از ۱ روز ۰/۰۱۳۸ کیلوگرم بر سـانتی متر مربع و ۳۲/۴۴ بوده که مشابه دو حالت قبل به دلیل کم بودن زمان عمل‌آوری عملا تغییری نسـبت به نمونه بدون افزودنی دیده نمی‌شـود لیکن بعد از گذشـت ۲۱ روز چسـبندگی نمونه ۱/۱۸ کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع و زاویه اصـطکاک داخلی به ۶/۴۰ درجه می‌شـود. بر این اسـاس مقاومت برشـی بعد از گذشـت یک روز، ۰/۶۳کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع بوده که این مقاومت بعد از گذشـت ۲۱ روز به ۱/۳ کیلوگرم بر سـانتی‌متر مربع رسـیده که ۱۰۶/۳ درصـد افزایش را نشـان می‌دهد. این موضـوع به خوبی تأثیر زمان عمل‌آوری را بر افزایش مقاومت برشـی نمونه نشـان داده ضـمن اینکه مشـخص می‌کند که تأثیر زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت برشی ماسه به مراتب بیشتر از غلظت محلول است.



(الف)



(ب)

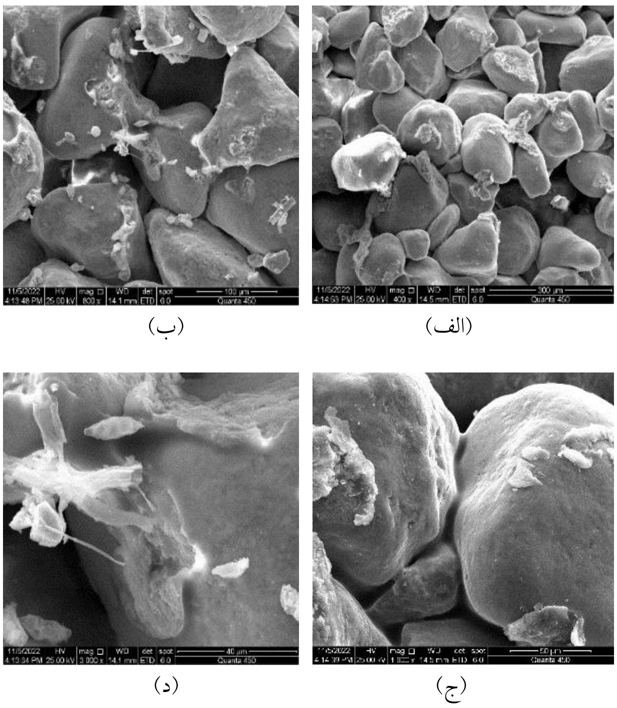


(ج)

شکل ۹ تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی به ازای تنش قائم معادل ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای نمونه‌های تثبیت شده در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت: (الف) با ۱۰ درصد محلول VA ، (ب) ۲۰ درصد محلول VA ، (ج) ۳۰ درصد محلول VA

بحث

نتایج ارائه شده در بخش قبل به روشنی نشان داد که محلول پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی ماسه‌بادی شده است. این افزایش ناشی از افزایش چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده بوده است. برای مشاهده دقیق‌تر از وضعیت و تغییرات ایجاد شده در نمونه‌های تثبیت شده، اقدام به تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های تثبیت شده با ۳۰ درصد محلول پلیمر به شرح ارائه شده در شکل (۱۰) گردید. مطابق شکل (۱۰) می‌توان گفت پلیمر با پر کردن فضاهای خالی و فاصله بین دانه‌ها و ایجاد پل‌ها و متصل کردن دانه‌ها به یکدیگر باعث افزایش چسبندگی و مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. پر واضح است که گذشت زمان باعث استحکام بیشتر پلیمر شده و در نتیجه مقاومت برشی ایجاد شده بیشتر خواهد شد. این مسئله با مقایسه مقاومت برشی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری یک روز با ۲۸ روز در شکل (۸) مشخص گردید. لیکن بعد از گذشت زمان مشخص تأثیر زمان بر استحکام بیشتر پلیمر کمتر می‌گردد. این موضوع نیز با مقایسه مقاومت برشی نمونه‌های عمل‌آوری شده در زمان‌های ۲۱ و ۲۸ روز با محلول ۳۰ درصد در شکل (۸) مشخص گردید.



(الف) (ب)

(ج) (د)

شکل ۱۰ تصاویر نمونه ماسه‌بادی تثبیت شده با ۳۰ درصد پلیمر، با بزرگ‌نمایی: (الف) ۴۰۰، (ب) ۸۰۰، (ج) ۱۶۰۰، (د) ۳۰۰۰ برابر

قرارگیری پوشش پلیمری روی ذرات ماسه باعث کاهش اصطکاک ناشی از تماس دانه‌ها با همدیگر شده و این موضوع باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده گردیده است. کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی در اثر افزودن پلیمر به ماسه قبلا توسط آناگنوستوپولوس و همکاران [38] گزارش شده است.

افزایش چسبندگی در اثر افزودن ۲ درصد نانوپلیمر پلی وینیل استات با زمان عمل‌آوری ۷ روزه از ۰/۳۶ به ۱/۴ [39] و همچنین افزایش چسبندگی از ۰/۲۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ۲/۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و کاهش زاویه اصطکاک داخلی از ۳۰ درجه به ۲۴ درجه در اثر افزودن رزین اپوکسی به ماسه برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روز گزارش شده است [38]. در تحقیق حاضر نیز افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی در اثر افزودن محلول پلیمری به ماسه‌بادی گزارش شده به‌طوری‌که چسبندگی ماسه‌بادی تثبیت شده با محلول پلیمری ۳۰ درصد و زمان عمل‌آوری ۲۱ روزه از ۰/۰۰۰۲ به ۱/۱۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش و زاویه اصطکاک داخلی آن از ۳۰/۷۵ به ۶/۴۰ درجه کاهش یافته است. افزایش چسبندگی به قدری زیاد است که باعث شده علی‌رغم کاهش ایجاد شده در زاویه اصطکاک داخلی افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی ایجاد شود.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر پلیمر وینیل اکریلیک بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم انجام شد. ابتدا محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از پلیمر وینیل اکریلیک ساخته شد و به نمونه خاک اضافه گردید. سپس نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه ساخته شده و در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند و نتایج زیر به دست آمد:

۱. با افزایش زمان عمل‌آوری و غلظت محلول پلیمری، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت برشی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، نسبت به نمونه فاقد افزودنی به ترتیب ۱۰۴، ۱۱۱/۷ و ۱۱۳/۳ درصد افزایش نشان می‌دهد.

۲. با افزایش غلظت محلول پلیمری و زمان عمل‌آوری چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که چسبندگی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، در زمان عمل‌آوری ۲۸، ۲۸ و ۲۱ روز به بیشترین مقدار خود ۰/۷۶، ۱/۱۳ و ۱/۱۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است.

۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد به وجود آمدن پل‌ها و اتصالات بین دانه‌ها با افزایش غلظت محلول و زمان عمل‌آوری دلیل افزایش چسبندگی است. قرارگیری پلیمر بین دانه‌ها باعث کاهش اصطکاک بین آن‌ها و کاهش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده گردیده است.

۴. افزایش زمان عمل‌آوری و افزایش غلظت محلول پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی نمونه شده لیکن تأثیر زمان عمل‌آوری بیشتر از غلظت محلول پلیمری می‌باشد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] J. Arias-Trujillo, A. Matías-Sanchez, B. Cantero, S. López-Querol, "Effect of polymer emulsion on the bearing capacity of aeolian sand under extreme confinement conditions," *Construction and building materials*, vol. 236, no. 10, pp. 117473, (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117473

[2] Y. Mohamedzein, A. Al-Hashmi, A. Al-Abri, A. Al-Shereiqi, "Polymers for stabilisation of wahiba dune sands Oman," *Proc. of the institution of civil engineers, Ground improvement*, vol. 172, no. 2, pp. 76-84, 2019. http://dx.doi org/10.1680/jgrim.17.00063

[3] P.L. Souza Júnior, O.F. Santos Junior, T.B. Fontoura, O. Freitas Neto, "Drained and undrained behavior of an aeolian sand from Natal Brazil", *Soils and rocks*, vol. 43, no. 2, pp. 263-270, (2020). http://dx.doi.org/10.28927/SR.432263

[4] E.S. Abu Seif, "Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand, Kharga Oasis, Western desert, Egypt: An Experimental Study," *Jordan journal of civil engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 270–284, (2013).

[5] A. J. Al-Taie, Y. J. Al-Shakarchi, A. A. Mohammed, "Investigation of geotechnical spesifications of sand dune: case study: around Baiji in Iraq", *International journal of advanced research*, vol. 14, no. 2, pp. 121-132, 2013.

[6] M. Al-Ansary, M.C. Pöppelreiter, A. Al-Jabry, S.R. Iyengar, "Geological and physiochemical characterization of construction sands in Qatar", *International journal of sustainable built environment*, vol. 1, no. 1, pp. 64-84, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2012.07.001

[7] M.G.M. Elipe, S. Lopez-Querol, "Aeolian sands: Characterization, Options of improvement and possible employment in construction– The state-of-the-art", *Construction and building materials*, vol. 73, pp. 728–739, (2014).

[8] P.J. Venda Oliveira, M.S. Costa, J.N.P. Costa, M.F. Nobre, "Comparison of the ability of two bacteria to improve the behaviour of a sandy soil", *Journal of materials in civil engineering*, vol. 27, no. 1, (2015). http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001138

[9] N. Abbasi, M. Mahdieh, "Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime", *International journal of geo-engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, (2018). http://dx.doi.org/10.1186/s40703-018-0072-4

[10] P.J. Venda Oliveira, J.A.O. Rosa, "Confined and unconfined behavior of a silty sand improved by the enzymatic biocementation method", *Transportation geotechnics*, vol. 24, p. 100400, (2020). http://dx.doi.org/10.1016/jtrgeo.2020.100400

[11] W. Akili, C.L. Monismith, “Permanent deformation characteristics of cement emulsion stabilized sand”, *Association of asphalt paving technologists proc*, vol. 47, pp. 281–301, (1978).

[12] H. Al-Abdul Wahhab, F. Bayomy, A. Al-Halhouli, “Evaluation of emulsified asphalt-treated sand for low-volume road and road bases”. *Fourth international conference on low-volume roads*, vol. 2, no. 1106, pp. 71–80, (1998).

[13] S.F.I. Al-Abdullah, “An approach in improving the properties of sand dunes”, *Journal of Engineering*, vol. 13, pp. 930–939, (2006).

[14] S. Onyejekwe, S. Ghataora, “Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. vol. 74, pp. 651–665, (2015). http://dx.doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8

[15] A.R. Zandieh, S.S. Yasrobi, “RETRACTED ARTICLE: Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer”, *Geotechnical and geological engineering*, vol. 28, pp. 139–145, (2010). http://dx.doi.org/10.1007/s10706-009-9287-7

[16] Y. Ohama, "Polymer-based admixtures", *Cement and concrete composites*, vol. 20, no. 1-2, pp. 189-212, (1998). https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00065-6

[17] R.A. Siddiqi, C.J. Moore, “Polymer stabilization of sandy soil for erosion control”, Transportation research records, vol. 827, pp. 30-34, (1981)

[18] S. Onyejekwe, S. Ghataora, “Stabilization of quarry fines using a polymeric additive and portland cement”, *Journal of Materials in Civil EngineeringArchive*, vol. 28, no. 1, (2016).
http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001324

[19] C. A. Anagnostopoulos, T. T. Papaliangas, “Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes”, *Journal of geotechanical and geoenvironmental engineering*, vol. 138, pp. 841-849, (2012). http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000648

[20] S. T. Gilazghi, J. Huang, S. Rezaeimalek, S. Bin-Shafique, “Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization”, *Engineering geology*, vol. 211, pp. 171-178, (2016). http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.007

[21] A. Al-Khanbashi, S.W. Abdalla, “Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil”. *Geotechnical and geological engineering*, vol. 24, pp. 1603–1625, (2006). http://dx.doi.org/10.1007/s10706-005-4895-3

[22] T. Hata, A. C. Saracho, A. Guharay, S. K. Haigh, “Strength characterization of cohesionless soil treated with cement and polyvinyl alcohol”, *Soils and foundations*, vol. 62, no. 6, p. 101238, (2020). https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101238

[23] A.F. Cabalar, M.H. Awraheem, M.M. Khalaf, “Geotechnical properties of a low- plasticity clay with biopolymer”, *Journal of material in civil engineering*, vol. 30, no. 8, (2018). http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002380

[24] W. Huang, C. Zhou, Z. Liu, H. Sun, J. Du, L. Zhang, “Improving soil-water characteristics and pore structure of silty soil using nano-aqueous polymer stabilizers”, KSCE Journal for civil engineering, vol. 25, no. 9, pp. 3298–

3305, (2021). http://dx.doi.org/10.1007/s12205-021-2036-z

[25] G. Tadayonfar, V. Ta Improving the permeability of silty soils using vinyl acetate polymer dayonfar, R. Kazemi, "Improving the permeability of silty soils using vinyl acetate polymer", *First national conference on soil mechanics and foundation engineering*, Tehran, 2013, (in Persian).

[26] B. Indraratna, R. Athukorala, J. Vinod, "Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 701-714, (2013). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000766

[27] I. Chang, J. Im, G.C. Cho, "Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand," *Canadian geotechnical journal*, vol. 53, no. 10, pp. 1658–1670, (2016). http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2015-0475

[28] S. Lee, I. Chang, M.K. Chung, Y. Kim, J. Kee, "Geotechnical shear behavior of Xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing," *Geomechanics and engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 831–847, (2017). http://dx.doi.org/10.12989/gae.2017.12.5.831

[29] N. R. Maildrreh, I. Shooshpasha, S. M. Mirhosseini, M. Dehestani, "Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests", *International journal of geotechnical engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 491499, (2018). https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1298300

[30] M. Khaleghian, and H. Saba, "Investigation of the parameters of clayey sand soils stabilized with lime and polyvinyl acetate nanopolymer", *the second conference on civil engineering*, architecture and urban planning in the countries of the Islamic world, Tabriz, 2018, (in Persian).

[31] Z. Hajiannejad, M. Karamati, M. Alinjad, R. Naderi, "Investigation of the shear strength of sand soil of Bandar Anzali reinforced with polyethylene terephthalate" (PET), *Amir Kabir civil engineering journal*, vol 52, no 12, pp 14-14, 2019, (in Persian).

[32] J. Liu, Z. Song, Y. Lu, Q. Wang, F. Kong, F. Bu, D.P. Kanungo, S. Sun, "Improvement effect of water based organic polymer on the strength properties of fiber glass reinforced sand", *Polymers*, vol. 10, no. 8, pp. 836, (2018). https://doi.org/10.3390/polym10080836

[33] A. Zandieh, S. Yasrebi, M. Mortezaei, "Investigation of the effect of humidity on uniaxial samples stabilized with polymer", *The third national engineering congress*, 2006, (in Persian).

[34] H. Soltani jigheh, "Behavior of clay-sand mixtures under undrained triaxial conditions", *Ferdowsi civil engineering*, vol. 31, no. 20, pp. 113-126, (2018).

[35] A. Janalizadeh, A. Rabiei, M. Absari, "Investigating the effect of adding water-soluble polymer on the mechanical parameters of kaolinite clay", *Second national conference on soil mechanics and earth engineering*, 2014, (in Persian).

[36] M. Attom, and A. Al-Tamimi, "Effects of polypropylene fibers on the shear strength of sandy soil", *International journal of geosciences*, vol. 1, no. 1, pp. 44-50, (2010).

[37] P. Ahmadi Motlagh, H. Soltani Jigheh, "Investigating the effect of liquid polymer on the undrained behavior of sandy soil using a triaxial device", *Master's thesis, Shahid madani university of Azerbaijan, Faculty of engineering and technology*, 2016, (in Persian).

[38] X. Yao, G. Huang, M. Wang, X. Dong, “Mechanical properties and microstructure of PVA fiber reinforced cemented soil,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, pp. 482–491, (2021). http://dx.doi.org/10.1007/s12205-020-0998-x

[39] H. Fatehi, M. Abtahi, H. Hashem Al-Hosseini, “Improving the strength parameters of granular soil using casein biopolymers and carinat sodium salt”, *Master's thesis, Isfahan university of technology*, *Faculty of engineering construction*, 2016, (in Persian).

[40] C. Anagnostopoulos, P. Kandiliotis, M. Lola, and S. Karavatos, “Effect of Epoxy Resin Mixtures on the Physical and Mechanical Properties of Sand”, *Research journal of applied sciences*, *Engineering and technology*, Vol. 7, no. 17, pp. 3478-3490, (2014). http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.7.700